Vidéographie aérienne légère

Principes et guide de mise en œuvre

Exemple d’application à la cartographie des camps de réfugiés du Kenya (UNHCR)

Marc Souris, IRD, 1999

Avant-propos

Ce document présente la méthode d'acquisition de données aériennes par vidéographie numérique que nous avons développée et décrit sa mise en œuvre, de la préparation du vol au mosaïquage et à l'intégration dans un système d'information géographique (SAVANE). Il est divisé en deux parties : un résumé présentant rapidement la méthode et les résultats, et un guide technique décrivant en détail l'ensemble des opérations.

L'exemple présenté tout au long de ce document concerne les camps de réfugiés du Kenya, sur lesquels nous avons appliqué cette méthode d'acquisition d'images aériennes afin d'aboutir à une cartographie précise des camps. Cette application s'inscrit dans un programme de recherche sur les réfugiés faisant l'objet d'une convention entre le Haut Commissariat aux Réfugiés des Nations Unies (UNHCR) et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, ex-ORSTOM).

L'auteur

Marc Souris est chargé de recherche à l'Institut de Recherche pour le développement (IRD, ex-ORSTOM). Mathématicien et informaticien, il est spécialiste des bases de données et des systèmes d'information géographique. Il est l'auteur principal du système d'information géographique SAVANE.



Remerciements à…

Sylvain Bonvallot (géophysique, IRD Centre Ile-de-France), pour ses conseils sur le positionnement par GPS. Pour nos applications de positionnement, nous avons pu utiliser les GPS de l'unité de géophysique de l'IRD grâce à Sylvain Bonvallot.
Luc Cambrezy (géographie, IRD, Centre Ile-de-France), responsable pour l'IRD du programme sur les réfugiés. Luc Cambrezy a participé directement aux essais de prise de vue, à l'élaboration des vols, et à la prise de vue sur les camps de réfugiés du Kenya. Il a effectué le mosaïquage des images pour les camps de Ifo, Dagahaley et Hagadera,
Damien Chaminade (CSN, Nairobi), pour son aide lors de la prise de point GPS au Kenya et pour sa participation au mosaiquage,
Jean Cheneau (IRD, Centre Ile-de-France), pour la construction de la fixation de la caméra,
Jean-Louis Janeau (pédologie, IRD, Quito), qui a participé aux premiers essais de caméra vidéo embarquée à Quito (Equateur),
Gad N. Kamau (chef pilote, Nairobi) et la compagnie aérienne (Z. Boskovic Air Charter Ltd.), pour sa disponibilité et sa haute compétence,
Bernard Lortic (cartographie et télédétection, IRD, Centre Ile-de-France), pour ses conseils et son aide (prise de vue, redressement des images) ,
Erwan Moreau (audiovisuel, IRD, Centre Ile-de-France), ainsi que l'atelier audiovisuel, pour ses conseils, l'aide pratique de l'atelier et le prêt de matériel audiovisuel (caméra et accessoires),
Pierre Peltre, responsable du Laboratoire de Cartographie appliquée de l'IRD, pour son appui, ses conseils, et l'aide pratique du laboratoire de cartographie (caméra, GPS),
Dominique Remy (informatique, IRD, Centre Ile-de-France), pour sa participation au développement du système Savane,
Le *UNHCR Nairobi* et les *responsables des camps de Dadaab et Kakuma* (Kenya), pour l'accueil dans les camps et la logistique mise à notre disposition (autorisations, voitures, chauffeurs, escortes).

Sommaire

Capture d'images fixes

Le principe de la vidéographie numérique
Le format DV
La capture d'images fixes

Recalage et mosaïquage

Principes de redressement et de ré-échantillonage
L'opération de redressement
Le mosaïquage et l'introduction dans un SIG

Utilisation dans un système d'information géographique

Rappel sur les systèmes d'information géographique
La gestion des mosaïques
La saisie sur mosaïque

Résumé

La vidéographie aérienne

La méthode d'acquisition de données aériennes par vidéographie numérique proposée dans ce document permet d'obtenir des images aériennes avec une résolution possible (c'est-à-dire la taille d'un pixel, élément d'image) variant dans une plage allant de 3 mètres à 0.2 mètres. Elle se situe ainsi entre la résolution des satellites d'observation civils actuels les plus performants et la photographie aérienne classique. La méthode développée vise à répondre à des contraintes souvent rencontrées dans les pays en développement, à minimiser les délais, les coûts et l'infrastructure nécessaire à la prise de vue aérienne.

La télédétection aérienne légère répond à de nombreux besoins techniques : cartographie de base, cartographie d'occupation du sol à grande échelle, cartographie thématique, échantillonnage, actualisation, etc. De nombreux domaines d'application sont concernés par ces techniques : on peut citer l'hydrologie (irrigation et gestion des ressources en eau), l'environnement et la gestion des ressources naturelles, le développement rural, le développement urbain, les applications cadastrales…

Les principes de la méthode présentée dans ce document sont les suivants : après préparation d'un plan de vol précis, le survol par avion léger avec un caméscope numérique embarqué et dirigé vers le sol de façon approximativement orthogonale permet de disposer d'un film vidéo couvrant la surface désirée, par traces parallèles avec un certain recouvrement entre traces. A partir du film vidéo numérique, on peut extraire directement des images numériques fixes sur un ordinateur. L'utilisateur a le choix des images à capturer : il doit seulement s'assurer du recouvrement des images et de la meilleure assiette possible de l'avion.
Après capture des images sur un ordinateur, il est nécessaire de trouver des points de référence géographique pour localiser, recaler et redresser les images, et éliminer ainsi les déformations dues à la prise de vue (déformations optiques, assiette de l'avion, altitude). On associe position d'un point dans l'image capturée et position géographique réelle pour créer des points d'amer. La position géographique réelle peut être déterminée directement par GPS sur le terrain, ou sur une photographie déjà recalée et positionnée, sur une carte, etc. Enfin, grâce aux points d'amer, les images capturées sont redressées (c'est-à-dire mises en conformité géographique), recalées (c'est-à-dire positionnées dans l'espace), puis mosaïquées (c'est-à-dire intégrées dans un ensemble d'images) pour constituer une mosaïque géo-référencée.
Cette mosaïque est intégrée dans un système d'information géographique qui permet à son tour d'utiliser la mosaïque comme base cartographique pour des travaux ultérieurs (digitalisation, représentation, cartographie, etc.).

Application aux camps de réfugiés du Kenya

La méthode décrite ci-dessus a été utilisée pour effectuer la cartographie des camps de réfugiées du Kenya (Kakuma, Dadaab), dans le cadre du programme de recherche sur les réfugiés faisant l'objet d'une convention entre l'UNHCR et l'IRD (ex-ORSTOM).

De nombreuses difficultés étaient réunies sur ce site : accès difficile (les camps sont éloignés des grandes agglomérations), conditions météorologiques instables (répercutions climatiques de El Niño), absence de cartographie à grande et à moyenne échelle, difficultés logistiques, problèmes de sécurité, etc. Néanmoins, la méthode de prise de vue s'est montrée efficace malgré ces conditions difficiles : nous avons ainsi pu réaliser des mosaïques géo-référencées des quatre camps de réfugiés du Kenya : kakuma, Ifo, Dagahaley, Hagadera. La méthode ainsi que les résultats obtenus sont présentés dans la seconde partie de ce document.

Différentes figures en petit format décrivant l'ensemble de la manip Kenya

0. Image satellite de dadaab
1. Plan de vol Hagadera
2. Avion et préparation
3. Suivi GPS du survol (hagadera)
4. Capture d'image fixe
5. GPS Hagadera au sol
6. Mosaïquage et intégration
7. Résultat : mosaique globale
8. Digitalisation sur écran

Guide technique de mise en œuvre

Chapitre 1
Généralités

Nombreuses sont les méthodes d'acquisition d'images de la Terre par télédétection, de la photographie aérienne à la télédétection spatiale par satellite. La méthode d'acquisition de données aériennes proposée dans ce document (par vidéographie numérique) vise à répondre à des contraintes souvent rencontrées dans les pays en développement, à minimiser les délais, les coûts et l'infrastructure nécessaire. La résolution possible (c'est-à-dire la taille d'un pixel, élément d'image) varie dans une plage allant de 3 mètres à 0.2 mètres. Elle se situe ainsi entre la résolution des satellites d'observation civils actuels les plus performants et la photographie aérienne classique.

Le développement de cette méthode d'acquisition s'inscrit dans le cadre de l'innovation méthodologique sur les systèmes d'information géographique (SIG) : elle s'accompagne du développement des méthodes et des logiciels pour le redressement, le mosaïquage, la gestion intégrée et le traitement des données de type image dans un SIG (Savane). Nous présentons donc dans ce guide toutes les étapes de la méthode, de l'acquisition des images à leur intégration dans un système d'information géographique. La méthode de redressement et de mosaïquage s'appuie sur les principes de redressement d'images avec prise de vue non calibrée.

Cette méthode d'acquisition d'image a été appliquée au Kenya, dans le cadre du programme de recherche IRD-UNHCR sur les réfugiés. Ce guide décrit en détail cet exemple d'application, qui réunit à lui seul de nombreuses difficultés de mise en œuvre (accessibilité, sécurité, infrastructure, climat,…).

La télédétection aérienne légère : de nombreuses applications

La télédétection aérienne légère concerne toutes les techniques visant à obtenir des images aériennes de la Terre par des moyens aériens légers et faciles à mettre en œuvre. Elle complète la photographie aérienne classique et la télédétection spatiale.

La télédétection aérienne légère répond à de nombreux besoins techniques : cartographie de base, cartographie d'occupation du sol à grande échelle, cartographie thématique, échantillonnage, actualisation, etc. De nombreux domaines d'application sont concernés par ces techniques : on peut citer l'hydrologie (irrigation et gestion des ressources en eau), l'environnement et la gestion des ressources naturelles, le développement rural, le développement urbain, les applications cadastrales…

La télédétection aérienne légère, comme toutes les techniques de télédétection, associe un appareil de prise de vue à un moyen de transport de cet appareil. Parmi les moyens de transport, on peut citer : les avions légers monomoteur, les hélicoptères, les ULM, les drones (avions sans pilotes), les ballons captifs, les dirigeables et montgolfières. Les appareils de prises de vue forment deux groupes : d'une part les appareils optiques classiques, d'autre part les appareils numériques. La méthode présentée dans ce document – la vidéographie aérienne - utilise une caméra vidéo numérique embarquée dans un avion léger ou un ULM.

La vidéographie aérienne : principes généraux

Le principe général de la vidéographie aérienne est le suivant :

Après préparation d'un plan de vol précis, le survol par avion léger avec un caméscope numérique embarqué et dirigé vers le sol de façon approximativement orthogonale permet de disposer d'un film

vidéo couvrant la surface désirée, par traces parallèles avec un certain recouvrement entre traces. A partir du film vidéo, on peut extraire directement des images numériques fixes sur un ordinateur. L'utilisateur a le choix des images à capturer : il doit seulement s'assurer du recouvrement des images et de la meilleure assiette possible de l'avion.

Après impression (facultative) des images sur papier, il est nécessaire de trouver des points de référence géographique pour localiser, recaler et redresser les images, et éliminer ainsi les déformations dues à la prise de vue (déformations optiques, assiette de l'avion, altitude). On associe position d'un point dans l'image capturée et position géographique réelle pour créer des points d'amer. La position géographique réelle peut être déterminée directement par GPS sur le terrain, ou sur une photographie déjà recalée et positionnée, sur une carte, etc. Enfin, grâce aux points d'amer, les images capturées sont redressées (c'est-à-dire mises en conformité géographique), recalées (c'est-à-dire positionnées dans l'espace), puis mosaïquées (c'est-à-dire intégrées dans un ensemble d'images) pour constituer une mosaïque géoréférencée.

Nous allons tout d'abord situer cette méthode dans le contexte général des moyens d'acquisition d'images dans le spectre visible.

Les moyens actuels d'acquisition d'images de télédétection dans le spectre visible

A l'heure actuelle (1999), les moyens civils d'acquisition d'images de la Terre en télédétection dans le spectre visible sont nombreux et performants. Par ordre de résolution (la taille d'un pixel, élément d'image), ce sont :

- les satellites à basse résolution (taille du pixel supérieure à 500 mètres),
- les satellites à moyenne résolution (taille du pixel entre 500 et 50 mètres)
- les satellites à haute résolution (taille du pixel entre 50 et 5 mètres),
- les satellites à très haute résolution (taille du pixel inférieure à 5 mètres),
- la vidéographie aérienne (taille du pixel inférieure à trois mètres),
- la photographie aérienne.

Les meilleures images satellites actuelles (domaine civil) ont donc une résolution habituelle d'une dizaine de mètres dans le spectre visible.

La vidéographie aérienne permet d'obtenir des résolutions variant entre 3 et 0.2 mètres. Les satellites à basse et moyenne résolution ne rentrent pas dans ce champ d'application. Les images des satellites civils à haute résolution ont une résolution qui peut atteindre deux mètres, mais les images les plus courantes sont celles du satellite SPOT (10 mètres en panchromatique, 20 mètres en multispectral). Le coût varie de 0.3 USD/km^2 pour Landsat (une scène couvre 34000 km^2) à 0.6 USD/km^2 pour Spot (une scène couvrant 3600 km^2). D'autres satellites à haute résolution (entre 5 et 2 mètre) devraient être lancés dans les années qui viennent (2000-2005), et pourraient donc rendre obsolète la technique d'acquisition par vidéographie numérique. A moins que la souplesse de la méthode, la vitesse d'obtention du résultat et l'augmentation de résolution des capteurs vidéo ne continuent à la rendre compétitive.

De tous les moyens d'acquisition, la photographie aérienne classique reste actuellement la plus performante en terme de résolution : une photographie aérienne classique scannée permet d'avoir une résolution largement inférieure au mètre. A l'inverse, son coût est important (à partir de 50 USD/km^2 pour une mission de 1000 km^2) et la mise en œuvre d'une campagne de photographie aérienne demande des moyens assez lourds. Lorsque le critère principal est la résolution et qu'il existe déjà une couverture aérienne récente par photographie, il est bien sûr préférable d'acheter puis de scanner les photographies plutôt que de refaire une prise de vue avec une autre méthode d'acquisition. Mais souvent manque la couleur : la plupart des photographies aériennes sont en noir et blanc.

La vidéographie aérienne permet donc d'assurer la continuité des résolutions entre les images des satellites de haute résolution et les photographies aériennes classiques. On peut établir un tableau comparatif des diverses méthodes suivant plusieurs critères :

	résolution	**disponibilité**	**Coût**	**météo**	**Temps d'acquisition**
Satellite	De 30 m à 2 m	Dépend du satellite et des conditions météo	0.3 à 0.6 USD/km²	Pas de nuages	De quelques jours à quelques mois
Vidéographie	De 3m à 0.2 m	A mettre en œuvre Avion léger, caméra, GPS	5 à 20 USD/km²	Pas de nuages à une altitude inférieure au vol	Quelques jours
Photographie	Jusqu'à 0.1 m	Moyens classiques de la photographie aérienne	10 à 50 UDS/km²	Pas de nuages à une altitude inférieure au vol	De quelques jours à quelques semaines



Fig. 1 : exemple d’images à différentes résolutions pour un même lieu : satellite Landsat (30 mètres), SPOT multispectral (20 mètres), SPOT panchromatique (10 mètres), vidéographie (1 mètre).

La vidéographie aérienne : principes des techniques employées

La vidéographie aérienne utilise plusieurs techniques dont il est utile de connaître les principes : la géodésie et la cartographie, la navigation aérienne précise, la vidéographie numérique, le positionnement par GPS différentiel, le redressement et le ré-échantillonnage d'image, le mosaïquage et les systèmes d'information géographique.

La géodésie et la cartographie
Pour exprimer la position d'un point sur la Terre, on utilise une surface mathématique simple se rapprochant au mieux de la forme réelle de la Terre. Cette surface a la forme d'un ellipsoïde de révolution, et permet d'exprimer la position d'un point grâce aux coordonnées sphériques : la longitude, la latitude, l'altitude par rapport à la surface de l'ellipsoïde. En pratique, plusieurs tailles et positions d'ellipsoïdes sont utilisées : il est nécessaire d'être vigilant sur les paramètres utilisés (le datum).
Pour représenter un morceau de cette surface curviligne sur une surface plane, on utilise une opération de projection cartographique qui déforme la surface curviligne et la projette sur un plan en deux dimensions.

La navigation aérienne
Pour assurer un bon recouvrement de la surface à cartographier, il est nécessaire d'indiquer au pilote de l'avion léger l'ensemble des paramètres lui permettant d'assurer une navigation précise. Un plan de vol peut être établi en utilisant les coordonnées géographiques des points d'entrée et de sortie des traces (la navigation se fait lors au GPS suivant une orthodromie, ligne de plus courte distance curviligne entre deux points de même altitude), ou en indiquant un point d'entrée et un cap (la navigation se fait alors au compas et suit une loxodromie, à condition de tenir compte de la dérive de l'avion).

Le principe de la vidéographie et le format numérique miniDV
Un film vidéo est constitué d'images cadencées (trames), à raison de 50 (PAL, SECAM) ou 60 (NTSC) images par seconde. Chaque trame correspond au balayage d'une ligne sur deux d'un écran, ce qui permet d'avoir une image complète tout les 1/25-ième (PAL, SECAM) ou 1/30-ième (NTSC) de seconde et d'assurer un meilleur rendu du mouvement (on dit que les images sont entrelacées, avec une trame paire, une trame impaire).
Le format vidéo numérique miniDV comprend 720*576 pixels pour chaque trame.

L'acquisition d'image fixe
On peut capturer une image à partir de deux trames consécutives du film vidéo, afin d'obtenir une image fixe. Grâce au codage numérique du signal et à la résolution du format DV, les images fixes sont d'excellente qualité, impossible à obtenir avec un caméscope analogique au format Hi8.
Si la vitesse de déplacement du sujet par rapport au caméscope est importante, deux trames consécutives (distantes de 1/50-ième ou 1/60-ième de seconde) présentent des différences importantes et l'image fixe est constituée à partir d'une seule des deux trames grâce à une légère interpolation entre les lignes.

Le principe du GPS différentiel
Le système GPS (Global Positioning System) est un système de positionnement mondial par satellite permettant de calculer la position de n'importe quel point sur la Terre, dans les trois dimensions. De façon instantanée, le système GPS permet d'avoir une précision de l'ordre de 100 mètres, les mesures étant brouillées par plusieurs facteurs : erreur sur les paramètres orbitaux des satellites, erreurs sur l'horloge des satellites, erreurs de propagation du signal dues aux conditions météorologiques et à la position des satellites, erreur due à l'horloge du récepteur, erreurs de réception dues aux réflexions du signal, dégradation volontaire du signal par le Department of Defense des USA, propriétaire du système.
Pour localiser avec une précision correspondant à la résolution des images, il est nécessaire d'effectuer des mesures avec une précision relative entre tous les points inférieure au mètre. Cette précision peut être obtenue par la méthode du GPS différentiel.

Le redressement et le ré-échantillonnage des images
En établissant la correspondance entre des points de l'image et des points localisés géographiquement (servant d'amers), on peut calculer les modifications à apporter à l'image pour la faire coïncider avec la réalité géographique suivant une projection géographique donnée. On appelle redressement ou recalage cette opération de mise en conformité géographique. Avec deux amers, on peut effectuer une rotation suivie d'une translation. Avec trois points d'amers, on peut effectuer une déformation polynomiale de degré 1. Avec quatre amers, une déformation projective. Avec de nombreux points d'amers, on peut effectuer un redressement local par redressement de degré 1 dans chaque triangle provenant de la triangulation entre les points d'amers, après un premier redressement global.
Le ré-échantillonnage permet de modifier la résolution dans l'image recalée, en choisissant les pixels à prendre en compte dans l'image de départ pour calculer la valeur d'un pixel recalé dans l'image d'arrivée.

Le mosaïquage et les systèmes d'information géographiques
A partir des images recalées, on constitue une seule grande image en intégrant les pixels des images redressées dans un seul ensemble. La structure d'une mosaïque est plus complexe que celle d'une image simple, car la mosaïque n'a pas forcément la forme d'un rectangle. Les mosaïques sont gérées par les systèmes d'information géographique. Ces systèmes permettent de gérer d'autres types de données géographiques (zones, lignes, points) et de comparer entre elles ces données de types différents.

Matériel et logiciels nécessaires à la mise en œuvre de la vidéographie aérienne

Matériel nécessaire :
Une caméra vidéo numérique avec possibilité de capture d'images fixes sur ordinateur (type SONY DCR-VX1000E avec carte d'acquisition DVBK2000E pour ordinateur).
Une batterie 12V 7VAH (minimum) étanche, un chargeur de batterie 12 V et une alimentation spéciale 12V pour la caméra.
Une fixation spéciale permettant de fixer la caméra verticalement hors de l'avion, avec réglage d'assiette et d'inclinaison.
Une mire de réglage pour la focale (pour les caméras à focale variable n'indiquant pas la focale).
En option, un petit moniteur de contrôle 12 V avec entrée vidéo.
Deux GPS permettant les mesures différentielles pour un positionnement relatif inférieur au mètre (type MAGELLAN PROMARK X CM).
Deux antennes professionnelles avec tripode pour les GPS.
Un ordinateur pour charger les mesures à partir des GPS (opération nécessaire à chaque demi-journée de mesure), pour capturer les images à partir de la caméra, pour recaler, ré-échantillonner, mosaïquer, et utiliser la mosaïque.

Logiciels nécessaires :
Logiciel d'acquisition d'images fixes (fourni avec la caméra ou la carte d'acquisition),
Logiciel de calcul en différentiel pour GPS (fourni avec les GPS),
Logiciel de préparation de survol, de redressement d'image et de mosaïquage,
Système d'information géographique supportant les mosaïques ou les images de volume important.

Le système d'information géographique *SAVANE* a été utilisé pour toutes les opérations présentées dans ce document.

Evaluation des coûts effectifs

Pour évaluer le coût de revient d'une opération de vidéographie aérienne, nous estimons l'amortissement des matériels et logiciels, le coût de l'infrastructure (location d'un avion), le coût de la main d'œuvre (estimée au tarif d'expertise de l'Institut), le coût du déplacement.

Matériel et logiciels :
Prise de vue : 25 KF (caméra), 4 KF (capture), moniteur de contrôle (1 KF), divers caméra (1 KF).
GPS différentiel : deux récepteurs (120 KF), deux antennes (15 KF), trépieds (2 KF).
Ordinateur portable : 25 KF.
Logiciels : dépend du SIG utilisé (12 KF pour le système SAVANE)
Le coût total à l'achat du matériel et logiciel est donc de l'ordre de 200 KF. En envisageant un amortissement sur 3 ans, et à raison de quatre opérations par an, l'amortissement sur une opération peut être estimé à 10 KF (les GPS et l'ordinateur sont également amortis sur d'autres opérations). Sans les GPS, l'amortissement tombe à moins de 5 KF.

Données et cartes initiales
Cartes, image satellite ou photographies aériennes (une scène Spot panchro coûte environ 6 KF).

Prise de vue :
Coût d'une mission de terrain de quelques jours pour un ingénieur (3 KF/jour)
Location d'un avion avec pilote (entre 1 KF et 4 KF/heure)

Campagne GPS :
Coût d'une mission de terrain de plusieurs jours pour un ingénieur ou technicien (2 KF/jour)

Capture et redressement des images :
Dépend du nombre d'image (environ 30 images/jour par opérateur) (1 KF/jour)

Le coût d'une opération varie donc entre 20 et 100 KF, auquel il faut ajouter les frais de déplacement.

Perspectives

Le domaine de la photographie numérique est en évolution très rapide, avec notamment l'apparition à de faible coût de capteurs haute résolution pour la prise de vue (en 1999, capteur de résolution supérieure à 1.3 MegaPixels pour une résolution d'image de 1600*1200). Si les principes énoncés plus haut restent valides, la caméra pourrait être avantageusement remplacée par un appareil de prise de vue de haute résolution permettant de saisir et de stocker en temps réel un grand nombre d'images numériques sous forme magnétique, à une cadence compatible avec les besoins de la prise de vue aérienne (environ une image par seconde). Cette technologie permettrait de rendre la prise de vue plus facile et d'augmenter la résolution de façon importante.
Nous chercherons également à améliorer la fixation de l'appareil de prise de vue sur l'avion et à assurer sa verticalité par un système automatique simple (par cardan ou par gyroscope), ainsi qu'à mesurer avec précision la position exacte de la caméra à chaque instant, même si les principes de redressement utilisés permettent de s'affranchir de ces problèmes.

Chapitre 2

La planification d'une opération de vidéographie aérienne

Comme pour la prise de vue par photographie aérienne, il est nécessaire de planifier à l'avance toutes les étapes d'une opération de vidéographie aérienne. Cette planification concerne :

- La définition des objectifs (le territoire à couvrir, la résolution souhaitée),
- L'infrastructure disponible pour la prise de vue et la prise de points d'amers (accessibilité, sécurité, moyens de transport au sol. Moyens aériens disponibles).
- La prévision des conditions météorologiques.
- Les autorisations de survol aérien des territoires à couvrir.
- La préparation du matériel sur place.
- L'évaluation des coûts pour l'ensemble de l'opération envisagée (survol, prise de points GPS, cartographie existante, redressement, SIG).

La définition des objectifs de l'opération : territoire, résolution, précision

Le territoire à couvrir doit être défini avec précision. Les cartes de base existantes doivent servir à cette définition. Lorsque le territoire à couvrir n'est pas cartographié, une description géographique est nécessaire : points GPS, éléments singuliers, etc. Une image satellite, même à moyenne résolution, est très utile dans la phase de préparation.

La résolution souhaitée doit être définie à cette étape du projet. Le résultat de la vidéographie aérienne est une image numérique, constituée de pixels (éléments d'image). La résolution correspond à la précision relative des pixels dans l'image. Donner une résolution revient donc à donner une taille au pixel (un mètre de résolution signifie que la taille d'un pixel dans l'image est de un mètre).
On fixe la résolution en fonction de la taille minimum des objets qui doivent être visibles dans l'image (si l'on estime qu'il faut au moins quatre pixels dans chaque dimension pour reconnaître une voiture dans une image, et qu'une voiture mesure en moyenne quatre mètres en longueur, la résolution nécessaire pour voir une voiture dans une image est de un mètre). Pour fixer la résolution, il faut donc d'abord évaluer les besoins de précision en précisant les objets qui doivent être visibles dans l'image par leur taille réelle, ainsi que par le nombre de pixels nécessaires pour les représenter à la définition souhaitée.
La précision absolue correspond quant à elle à la précision de la localisation géographique de chaque pixel (dans la projection géographique utilisée). Cette précision absolue doit également être évalué à ce stade, car d'elle dépendra la planification des opération de prise de points d'amers, de redressement, de recalage.

Une image fixe capturée à partir du film vidéo a une résolution de 720 sur 576 pixels (format miniDV). Fixer la résolution donne donc la taille réelle de cette image dans le plan de projection. Sachant qu'un certain recouvrement entre les images est nécessaire pour assurer le mosaïquage des images (environ 20 % de la surface), on peut estimer le nombre d'images nécessaires à la réalisation d'une mosaïque en fonction du territoire à couvrir et de la résolution souhaitée.
Le nombre des images à traiter doit être compatible avec les capacités de stockage, de traitement, de redressement et de mosaïquage du projet. D'une manière générale, un projet devra essayer de ne pas dépasser quelques centaines d'images.

Exemple : Kakuma.

Grâce à des photographies aériennes de 1993, mosaïquées en utilisant des points de référence au sol, le territoire à couvrir pour cartographier ce camp de réfugiés du nord du Kenya et ses abords immédiats peut facilement être évalué (fig. 1) : la surface à survoler mesure 10 km sur 4, soit 40 km2. Nous souhaitions disposer d'une nouvelle mosaïque à une résolution de 1.5 mètres. A cette résolution, chaque image capturée à partir du film vidéo représente 1100 sur 775 mètres. Sans recouvrement, il faut donc 10 images par trace et 6 traces. Avec 20 % de recouvrement, il faut 12 images par trace et 8 traces, soit 96 images.

Fig. 2 : mosaïque de photographies aériennes de 1993

Exemple : Ifo, Dagahaley, Hagadera
Nous disposons d'une image du satellite SPOT qui, après un redressement général grâce à quelques points d'amers relevés sur le terrain par GPS (la différence d'altitude ne dépasse pas quelques mètres), permet de connaître la configuration générale du territoire (Fig. 3). Nous souhaitons disposer d'images à grande résolution (0.8 mètres).

Fig. 3 : image spot (composition colorée, résolution 20 m) de la région de Dadaab

L'infrastructure

Pour la prise de vue, un avion léger est nécessaire. Cet avion doit répondre à plusieurs exigences :

- être disponible localement,
- permettre la fixation de la caméra, et, donc, en général, permettre d'enlever une porte latérale,
- permettre de voler à l'altitude nécessaire pour respecter le plan de vol (cette altitude varie entre 800 et 3000 m au-dessus du sol, suivant le plan de vol adopté et la résolution souhaitée),
- avoir des instruments de bord permettant de suivre le plan de vol avec la précision demandée,
- avoir des coûts de location compatible avec le budget du projet.

Les différents avion du constructeur Cessna correspondent bien à ces exigences (en particulier, les ailes hautes permettent d'enlever une porte et de fixer la caméra sans difficulté).

Le pilotage de l'avion est sans doute la partie la plus aléatoire d'une opération de vidéographie aérienne. En effet, la navigation aérienne doit être très précise pour assurer un bon recouvrement entre les traces. Nous reviendrons en détail sur le pilotage dans le chapitre concernant la préparation de la prise de vue et le plan de vol.

Pour assurer la précision absolue des pixels et la localisation exacte des images, il est nécessaire de connaître la localisation géographique de points dans les images. Lorsque les cartes existantes ne permettent pas de connaître cette localisation, il faut se rendre sur le terrain avec des GPS pour relever des coordonnées géographiques. Dans ce cas, l'accès au sol doit être possible : les besoins en véhicules, les problèmes d'accessibilité et de sécurité doivent être évalués. Ces besoins sont fonction de la précision absolue souhaitée, de l'étendue du territoire à couvrir. Nous reviendrons en détail sur ces problèmes dans le chapitre concernant le relevé de points par GPS.

Autorisations et conditions météorologiques

De nombreux survols sont soumis à autorisation spéciale. Certains sont interdits. La prise de vues aériennes est souvent un domaine exclusif des militaires. Toutes les restrictions et dispositions administratives nécessaires doivent être évaluées avant d'entreprendre une opération de survol.

Les conditions météorologiques doivent être connues de façon générale. Ensuite, elles devront être compatibles localement avec le plan de vol élaboré, car la présence de nuages sous l'altitude de vol est fortement déconseillée. Les turbulences sont également déconseillées, car elles ont une influence directe sur l'assiette de l'avion et la qualité de la verticalité moyenne des images. Le vent latéral a également une grande influence, obligeant l'appareil à voler en « crabe » pour respecter le plan de vol : les images sont donc systématiquement prises avec un angle horizontal correspondant au lacet de l'avion.

Un ensoleillement vertical intense provoque toujours un effet de « point chaud » dans les images. Malgré cet effet, l'ensoleillement améliore le contraste et le piqué des images vidéo. Il est donc préférable d'effectuer un survol par temps clair et ensoleillé. Il faut, en revanche, éviter les différences d'ensoleillement successives qui provoqueront sur les images des différences importantes de contraste et de luminosité.

La préparation du matériel sur place

Pour la prise de vue avec une caméra vidéo numérique classique, il est nécessaire de disposer de :

- Une caméra vidéo numérique avec possibilité de capture d'images fixes sur ordinateur (nous utilisons une caméra SONY DCR-VX1000E avec carte de capture DVBK1000E).

- Un filtre UV pour la caméra.
- Des cassettes d'enregistrement (prévoir le double du temps de prise de vue réelle. Des cassettes d'une heure sont recommandées pour ne pas avoir à changer la cassette pendant le vol).
- Un chargeur d'alimentation 12 V pour la caméra (type chargeur pour allume-cigares).
- Une batterie 12V 7VAH (minimum) étanche et une alimentation spéciale 12V pour la caméra.
- Une fixation spéciale permettant de fixer la caméra verticalement hors de l'avion, avec réglage d'assiette et d'inclinaison.
- Une mire de réglage pour la focale (pour les caméras à focale variable n'indiquant pas la focale).
- En option, un petit moniteur de contrôle 12 V avec entrée vidéo, un câble pour relier la sortie vidéo de la caméra et l'entrée vidéo du moniteur, un câble d'alimentation 12 V pour le moniteur, une batterie 12 V 3VAH (minimum).
- Un chargeur de batterie 12 V.
- Un voltmètre.
- Outils nécessaires à la mise en place de la fixation : clés plates, tournevis.
- Ruban adhésif, ciseaux, fixations en plastiques pour câbles électriques. Bandes larges en caoutchouc (type chambre à air).

Si l'on utilise une caméra à haute résolution ne prenant que des images fixes, il est nécessaire de disposer d'un ordinateur portable avec une connexion de type PCMCIA pour capturer les images en temps réel.

Fig. 4 : Matériel nécessaire sur place

Chapitre 3
La préparation de la prise de vue

La navigation aérienne

La navigation aérienne précise est un exercice difficile. Le pilote doit avoir une certaine expérience dans ce domaine pour être capable de préparer et suivre un plan de vol compatible avec les besoins demandés et les capacités techniques de l'avion utilisé. Si le plan de vol doit être précis et bien suivi, c'est pour éviter d'avoir ensuite des zones non couvertes sur le territoire à cartographier. Aux précisions recherchées, un faible écart entre le vol de l'avion et le plan de vol peut engendrer des traces non jointives et rendre l'opération de survol incomplète.

D'une manière générale, l'avion doit suivre des traces régulières et parallèles pour couvrir l'ensemble du territoire à survoler (on aura intérêt à prévoir des traces à cap constant). Il faut également assurer un recouvrement latéral des traces pour pouvoir effectuer le mosaïquage des images par la suite. Il faut donc définir les traces avec le plus de précision possible.

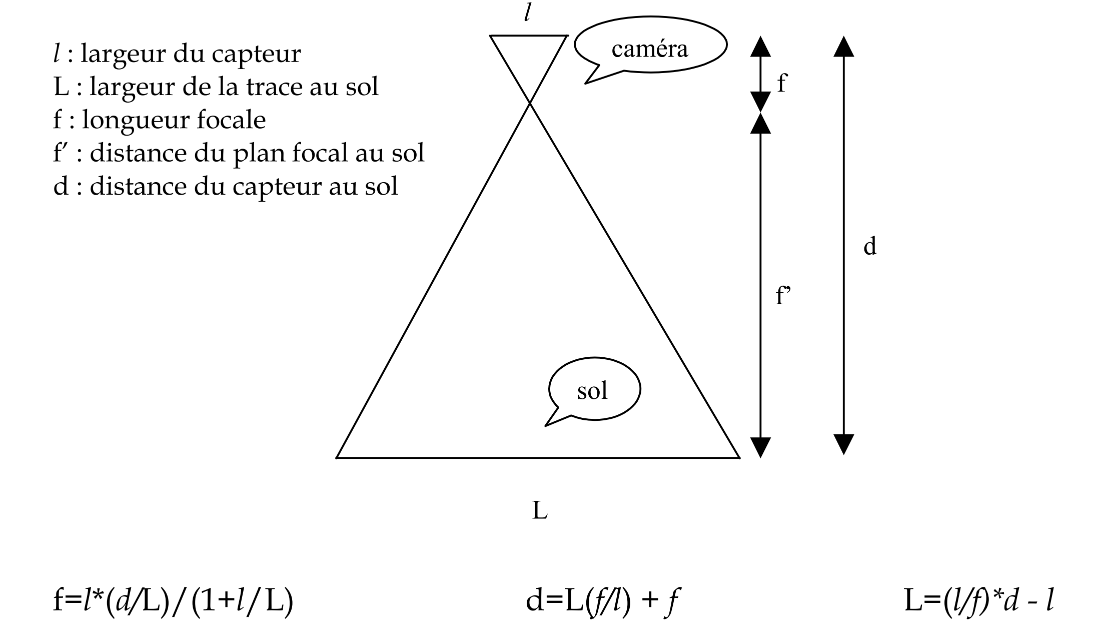
Pour suivre les traces, le pilote peut utiliser les instruments sophistiqués de navigation (GPS et pilote automatique) ou voler à vue en se servant de repères au sol. La première méthode est évidemment beaucoup plus fiable que la seconde, mais elle nécessite un équipement qui n'est pas toujours disponible sur les avions légers.
Pilote automatique et points GPS : le pilote introduit dans le GPS de l'avion des points que l'avion doit survoler (en général, les entrées et sorties de traces). Le pilote doit ensuite préparer son plan de vol pour que le pilote automatique de l'avion puisse suivre les traces (l'entrée dans la trace doit respecter le cap général de la trace).
Vol à vue : le pilote doit suivre des traces (entrée, sortie, cap) en se basant sur les objets repérés au sol (routes, immeubles, etc.). Ce type de navigation peut être difficile ou impossible lorsque les repères sont insuffisants, l'altitude trop élevée, la visibilité vers le sol trop faible, la dérive trop importante, etc.

La préparation du plan de vol

Quelle que soit la méthode de navigation, il est nécessaire d'établir un plan de vol très précis. Ce plan de vol comprend la définition de l'altitude, de la méthode (vol à vue ou par GPS), des points d'entrée et de sortie de trace, de la vitesse, de l'heure adéquate.

L'altitude

Le choix de l'altitude de vol est fonction de la résolution du capteur de la caméra, de la résolution souhaitée pour les images capturées et de la focale utilisée pour la caméra (voir les tableaux). Plusieurs considération doivent guider le choix de l'altitude de vol : les conditions météorologiques (pas de nuages, pas trop de turbulences), la meilleure focale (pas trop courte pour diminuer l'angle des rayons lumineux sur le bord des images), la résolution souhaitée. Lorsque la navigation se fait à vue, l'altitude ne doit pas être trop élevée (inférieure 2000 m au-dessus du sol).



$f = l*(d/L)/(1+l/L)$ $d = L(f/l) + f$ $L = (l/f)*d - l$

Dans les tableaux, on considère l = 36 mm pour obtenir une focale correspondant au format photographique 24x36. La largeur réelle d'un capteur CCD de caméra vidéo est beaucoup plus petite.

Tableau 1 : altitude de vol (en mètres) en fonction de la résolution (en mètres) et de la focale (en mm), pour le format miniDV (largeur de la capture 768 pixels)

	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
45	455	546	637	728	819	910	1001	1092
50	501	601	701	802	902	1002	1102	1202
55	565	678	791	904	1017	1130	1243	1356
60	615	738	861	984	1107	1230	1353	1476
65	674	809	944	1079	1214	1349	1483	1618
70	689	827	964	1102	1240	1378	1515	1653
73	744	893	1042	1191	1340	1489	1637	1786
76	789	947	1105	1263	1421	1579	1737	1895
80	845	1014	1183	1352	1522	1691	1860	2029
83	893	1071	1250	1428	1607	1785	1964	2143

	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
45	1183	1274	1365	1456	1547	1637	1728	1819
50	1303	1403	1503	1603	1703	1804	1904	2004
55	1470	1583	1696	1809	1922	2035	2148	2261
60	1599	1722	1845	1968	2091	2214	2337	2460
65	1753	1888	2023	2158	2292	2427	2562	2697
70	1791	1929	2067	2204	2342	2480	2618	2755
73	1935	2084	2233	2382	2531	2680	2828	2977
76	2052	2210	2368	2526	2684	2842	3000	3158
80	2198	2367	2536	2705	2874	3043	3212	3381
83	2321	2500	2678	2857	3035	3214	3392	3571

Tableau 2 : résolution (en mètres) en fonction de l'altitude de vol (en mètres) et de la focale utilisée (en mm), pour le format miniDV (largeur de la capture 768 pixels).

	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700
45	1,10	1,21	1,32	1,43	1,54	1,65	1,76	1,87
50	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70
55	0,88	0,97	1,06	1,15	1,24	1,33	1,42	1,50
60	0,81	0,89	0,98	1,06	1,14	1,22	1,30	1,38
65	0,74	0,82	0,89	0,96	1,04	1,11	1,19	1,26
70	0,73	0,80	0,87	0,94	1,02	1,09	1,16	1,23
73	0,67	0,74	0,81	0,87	0,94	1,01	1,07	1,14
76	0,63	0,70	0,76	0,82	0,89	0,95	1,01	1,08
80	0,59	0,65	0,71	0,77	0,83	0,89	0,95	1,01
83	0,56	0,62	0,67	0,73	0,78	0,84	0,90	0,95

	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500
45	1,98	2,09	2,20	2,31	2,42	2,53	2,64	2,75
50	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50
55	1,59	1,68	1,77	1,86	1,95	2,03	2,12	2,21
60	1,46	1,54	1,63	1,71	1,79	1,87	1,95	2,03
65	1,33	1,41	1,48	1,56	1,63	1,71	1,78	1,85
70	1,31	1,38	1,45	1,52	1,60	1,67	1,74	1,81
73	1,21	1,28	1,34	1,41	1,48	1,55	1,61	1,68
76	1,14	1,20	1,27	1,33	1,39	1,46	1,52	1,58
80	1,06	1,12	1,18	1,24	1,30	1,36	1,42	1,48
83	1,01	1,06	1,12	1,18	1,23	1,29	1,34	1,40

	2600	2700	2800	2900	3000
45	2,86	2,97	3,08	3,19	3,30
50	2,59	2,69	2,79	2,89	2,99
55	2,30	2,39	2,48	2,57	2,65
60	2,11	2,20	2,28	2,36	2,44
65	1,93	2,00	2,08	2,15	2,22
70	1,89	1,96	2,03	2,10	2,18
73	1,75	1,81	1,88	1,95	2,02
76	1,65	1,71	1,77	1,84	1,90
80	1,54	1,60	1,66	1,72	1,77
83	1,46	1,51	1,57	1,62	1,68

Tableau 3 : Etalonnage de la focale de la caméra SONY DCR-VX1000 E avec la mire (à 40 cm)

Mire (focale en 24x36)	Règle dans le viseur (m=40)	Règle en capture réelle	½ longueur de la règle sur la mire
45 (extrémité du zoom)	11.2 (ouvert)	9.5-72	31,5
50	12.8-66.8	11.8-69	28,6
55	16-63.8	14.8-65.5	25,35
60	17.9-61.8	16.9-63.5	23,3
65	20-60	19-61.5	21,25
70	21-59	20-61.6	20,8
73	22-58	21-59.5	19,25
76	23-57	21.9-58.2	18,15
80	24-56	23.2-57.1	16,95
83	25-55	24.1-56.2	16,05

Tableau 4 : conversion des mètres en feet (1 foot = 0.32806 mètre)

mètres	feet
1000	3049
1100	3354
1200	3659
1300	3963
1400	4268
1500	4573
1600	4878
1700	5183
1800	5488
1900	5793
2000	6098

mètres	feet
2100	6402
2200	6707
2300	7012
2400	7317
2500	7622
2600	7927
2700	8232
2800	8537
2900	8841
3000	9143
3100	9451

Entrées et sorties de trace

Lorsque le pilote vole aux instruments (GPS et pilote automatique), il faut lui indiquer avec précision les entrées et sorties de traces, avec les paramètres de l'ellipsoïde et le système de projection géographique utilisé par les instruments. Le pilote devra ensuite prévoir des virages suffisamment larges pour que l'avion puisse suivre la trace da façon rectiligne.
Le plan de vol est établi dans une projection géographique. Une trace rectiligne dans le plan de projection ne correspond pas, en général, à une trajectoire rectiligne dans l'espace. Il est utile de mesurer ces différences (car le pilote automatique va suivre la route la plus courte), ou de donner des points intermédiaires que l'avion devra survoler. Le cap n'est en général pas constant.
Si le pilote veut naviguer à cap constant à partir du point d'entrée dans la trace (c'est-à-dire suivre une loxodromie), les points d'entrée et de sortie des traces et les trajectoires doivent être soigneusement calculées : les loxodromies ne sont des droites que dans certaines projections géographiques.
Entrer des points d'amers dans le GPS de l'avion requiert un certain temps (deux heures environ pour un vol d'une heure). Ce travail doit être effectué au sol avant le vol et doit être prévu dans la préparation du survol.

Comme le plan de vol est établi en coordonnées cartésiennes dans le plan de projection, il faut transformer ces coordonnées en coordonnées géographiques dans le système employé par le GPS de l'avion (longitude, latitude, WGS 84). Il faut prêter une attention toute particulière aux paramètres employés pour cette conversion : ellipsoïde de la projection, ellipsoïde du GPS, paramètres de la projection géographique (une différence d'ellipsoïde peut engendrer des différences d'une centaine de mètres).

Le module SAVAMER du Système d'information Géographique SAVANE permet d'établir automatiquement le plan de vol à partir des coordonnées de la trace centrale, de la largeur des traces et du recouvrement souhaité. Il permet également de tracer le plan de vol sur la cartographie déjà existante dans la base de données.

La vitesse

La vitesse de l'avion a une influence sur la prise de vue, puisque l'avion va se déplacer pendant l'ouverture de l'obturateur de la caméra (l'obturation n'est pas mécanique : elle correspond en fait au temps de capture du signal). Un avion volant à 120 km/heure parcourt 33,3333 m par seconde, soit environ 3 cm par 1/1000 s, ce qui est faible par rapport à la précision recherchée en général. En revanche, l'avion va se déplacer de 0.66 m tous les 1/50-ième de seconde : la distance parcourue entre deux trames consécutives du film vidéo n'est pas négligeable. On a donc intérêt à voler à faible vitesse pour améliorer la capture d'images fixes, si l'image fixe est obtenue par interpolation entre deux trames consécutives. Le choix de la vitesse dépend donc des capacités de l'avion et du temps nécessaire pour survoler le territoire à couvrir.

L’heure du vol

L’heure du vol doit être choisie en fonction des conditions d’ensoleillement : il faut éviter au maximum les ombres portées et les turbulences dues aux phénomènes thermiques. La fin de matinée est généralement l’heure la plus adéquate pour entreprendre un survol aérien.

Exemples

Les exemples qui suivent concernent l’opération de survol des camps de réfugiés du UNHCR au Kenya. L’objectif de cette prise de vue est double : un objectif environnemental sur la région de Dadaab afin d’évaluer l’impact des camps sur l’environnement naturel, et un objectif de cartographie précise sur l’ensemble des camps (Ifo, Dagahaley, Hagadera, Kakuma) pour une évaluation censitaire par repérage visuel des habitations. Au niveau de la région, une précision de deux mètres est suffisante. Pour la cartographie précise des camps et le repérage visuel des huttes et de l’infrastructure interne des blocs, une précision inférieure au mètre est nécessaire. Nous avons donc établi deux séries de plan de vol correspondant à ces deux objectifs. Tous les plans de vol ont été calculés grâce au module SAVAMER du SIG SAVANE.

1. Plan de vol sur la région d’Ifo et de Dagahaley à une résolution de 2 mètres

On souhaite couvrir tout le territoire compris entre les deux camps de réfugiés. Le résultat doit avoir une résolution de deux mètres. Nous avons établi le plan de vol en définissant sur l’image satellite des traces parallèles de 18000 m de longueur et 1500 m de largeur, avec un recouvrement latéral entre les traces de 500 m. Les traces sont obliques (angle de 156 ° par rapport au nord géographique). L’ellipsoïde utilisé est *WGS 84*, la projection UTM (méridien central 39° est). La trace centrale a comme extrémités les points de coordonnées (642000,25000) et (647400,8600).

cap 336° + magnetic deviation (vers le nord-ouest) or 156°+magnetic deviation (vers le sud-est)
9 traces de 1500 m de largeur, 18 km de longueur, recouvrement de 30 % entre les traces (500 m)

N° point	Longitude (deg min)	Latitude (deg min)	X (UTM)	Y (UTM)
1	**40° 14.5131 e**	**0° 12.8898 n**	638200	23749
2	**40° 17.4246 e**	**0° 3.9883 n**	643600	7349
3	**40° 17.9357 e**	**0° 4.1580 n**	644550	7661
4	**40° 15.0252 e**	**0° 13.0585 n**	639150	24061
5	**40° 15.5372 e**	**0° 13.2282 n**	640100	24374
6	**40° 18.4477 e**	**0° 4.3277 n**	645500	7974
7	**40° 18.9597 e**	**0° 4.4974 n**	646450	8287
8	**40° 16.0493 e**	**0° 133979 n**	641050	24687
9	**40° 16.5613 e**	**0° 13.5676 n**	642000	25000
10	**40° 19.4717 e**	**0° 4.6672 n**	647400	8600
11	**40° 19.9838 e**	**0° 4.8369 n**	648349	8912
12	**40° 17.0734 e**	**0° 13.7373 n**	642949	25312
13	**40° 17.5854 e**	**0° 13.9069 n**	643899	25625
14	**40° 20.4958 e**	**0° 5.0066 n**	649299	9225
15	**40° 21.0078 e**	**0° 5.1763 n**	650249	9538
16	**40° 18.0974 e**	**0° 14.0766 n**	644849	25938
17	**40° 18.6095 e**	**0° 14.2463 n**	645799	26251
18	**40° 21.5198 e**	**0 ° 5.3460 n**	651199	9851

Fig. 5 : plan de vol régional IFO-DAGAHALEY

2. Plans de vol sur IFO, HAGADERA, DAGAHALEY pour une précision de 1 mètre

On souhaite couvrir chaque camp pour obtenir une résolution inférieure au mètre. Chaque trace couvre 600 m, avec un recouvrement latéral entre les traces de 200 m. L'ellipsoïde utilisé est *WGS 84*, la projection UTM (méridien central 39° est).

IFO : 9 traces de 5.5 km de longueur pour 600 m en largeur, 200 m de recouvrement latéral
Trace centrale : (649200,12300 n) à (643700,12300 n)

N° point	Longitude (deg min)	Latitude (deg min)	X (UTM)	Y (UTM)
1	**40° 20.4422 e**	**0° 7.5434 n**	**649200**	**13900**
2	**40° 17.4773 e**	**0° 7.5435 n**	**643700**	**13900**
3	**40° 17.4773 e**	**0° 7.3265 n**	**643700**	**13500**
4	**40° 20.4422 e**	**0° 7.3263 n**	**649200**	**13500**
5	**40° 20.4421 e**	**0° 7.1092 n**	**649200**	**13100**
6	**40° 17.4773 e**	**0° 7.1094 n**	**643700**	**13100**
7	**40° 17.4773 e**	**0° 6.8923 n**	**643700**	**12700**
8	**40° 20.4421 e**	**0° 6.8922 n**	**649200**	**12700**
9	**40° 20.4421 e**	**0° 6.6751 n**	**649200**	**12300**
10	**40° 17.4773 e**	**0° 6.6752 n**	**643700**	**12300**
11	**40° 17.4773 e**	**0° 6.4581 n**	**643700**	**11900**
12	**40° 20.4421 e**	**0° 6.4580 n**	**649200**	**11900**
13	**40° 20.4421 e**	**0° 6.2409 n**	**649200**	**11500**
14	**40° 17.4773 e**	**0° 6.2411 n**	**643700**	**11500**
15	**40° 17.4773 e**	**0° 6.0240 n**	**643700**	**11100**
16	**40° 20.4421 e**	**0° 6.0239 n**	**649200**	**11100**
17	**40° 20.4421 e**	**0° 5.8068 n**	**649200**	**10700**
18	**40° 17.4772 e**	**0° 5.8069 n**	**643700**	**10700**

Fig. 6 : plan de vol pour IFO

HAGADERA : 9 traces de 6.5 km en longueur pour 600m en largeur, 200 m de recouvrement latéral
Trace centrale : (649300,100 n) à (655800,100 n)

N° point	Longitude (deg min)	Latitude (deg min)	X (UTM)	Y (UTM)
1	**40° 20.4959 e**	**0° 0.8140 s**	**649300**	**9998500**
2	**40° 23.9997 e**	**0° 0.8140 s**	**655800**	**9998500**
3	**40° 23.9997 e**	**0° 0.5969 s**	**655800**	**9998900**
4	**40° 20.4959 e**	**0° 0.5970 s**	**649300**	**9998900**
5	**40° 20.4959 e**	**0° 0.3799 s**	**649300**	**9999300**
6	**40° 23.9997 e**	**0° 0.3799 s**	**655800**	**9999300**
7	**40° 23.9997 e**	**0° 0.1628 s**	**655800**	**9999700**
8	**40° 20.4959 e**	**0° 0.1628 s**	**649300**	**9999700**
9	**40° 20.4959 e**	**0° 0.0543 n**	**649300**	**100**
10	**40° 23.9997 e**	**0° 0.0543 n**	**655800**	**100**
11	**40° 23.9997 e**	**0° 0.2713 n**	**655800**	**500**
12	**40° 20.4959 e**	**0° 0.2713 n**	**649300**	**500**
13	**40° 20.4959 e**	**0° 0.4884 n**	**649300**	**900**
14	**40° 23.9997 e**	**0° 0.4884 n**	**655800**	**900**
15	**40° 23.9997 e**	**0° 0.7055 n**	**655800**	**1300**
16	**40° 20.4959 e**	**0° 0.7055 n**	**649300**	**1300**
17	**40° 20.4959 e**	**0° 0.9226 n**	**649300**	**1700**
18	**40° 23.9997 e**	**0° 0.9225 n**	**655800**	**1700**

Fig. 7 : plan de vol pour HAGADERA

DAGAHALEY : 9 traces de 4.8 km en longueur pour 600m en largeur, 200 m de recouvrement latéral
Trace centrale : (641000,21200 n) à (645800,21200 n)

N° point	Longitude (deg min)	Latitude (deg min)	X (UTM)	Y (UTM)
1	**40° 16.0220 e**	**0° 10.6370 n**	**641000**	**19600**
2	**40° 18.6095 e**	**0° 10.6368 n**	**645800**	**19600**
3	**40° 18.6096 e**	**0° 10.8539 n**	**645800**	**20000**
4	**40° 16.0220 e**	**0° 10.8541 n**	**641000**	**20000**
5	**40° 16.0220 e**	**0° 11.0712 n**	**641000**	**20400**
6	**40° 18.6096 e**	**0° 11.0710 n**	**645800**	**20400**
7	**40° 18.6096 e**	**0° 11.2881 n**	**645800**	**20800**
8	**40° 16.0221 e**	**0° 11.2883 n**	**641000**	**20800**
9	**40° 16.0221 e**	**0° 11.5053 n**	**641000**	**21200**
10	**40° 18.6096 e**	**0° 11.5052 n**	**645800**	**21200**
11	**40° 18.6096 e**	**0° 11.7222 n**	**645800**	**21600**
12	**40° 16.0221 e**	**0° 11.7224 n**	**641000**	**21600**
13	**40° 16.0221 e**	**0° 11.9395 n**	**641000**	**22000**
14	**40° 18.6096 e**	**0° 11.9393 n**	**645800**	**22000**
15	**40° 18.6097 e**	**0° 12.1564 n**	**645800**	**22400**
16	**40° 16.0221 e**	**0° 12.1566 n**	**641000**	**22400**
17	**40° 16.0221 e**	**0° 12.3737 n**	**641000**	**22800**
18	**40° 18.6097 e**	**0° 12.3735 n**	**645800**	**22800**

Fig. 8 : plan de vol pour DAGAHALEY

3. Plan de vol sur Kakuma pour une précision de 1.2 mètre

On souhaite couvrir le camp pour obtenir une résolution de 1,2 mètre. L'ellipsoïde utilisé est *WGS 84*, la projection UTM (méridien central 33° est).

KAKUMA : 12 traces de 1000 m de largeur, 10 km de longueur avec 50% de recouvrement (500 m)
Cap 0°+ magnetic dev (vers le nord) et 180 ° +magnetic dev (vers le sud)
Trace centrale : (704500,409000 n) à (704500,419000 n)

N° point	Longitude (d m)	Latitude (d m)	X (UTM)	Y (UTM)
1	**34° 48.8568 e**	**3° 41.9062 n**	**701500**	**409000**
2	**34° 48.8680 e**	**3° 47.3317 n**	**701500**	**419000**
3	**34° 49.1381 e**	**3° 47.3311 n**	**702000**	**419000**
4	**34° 49.1269 e**	**3° 41.9057 n**	**702000**	**409000**
5	**34° 49.3969 e**	**3° 41.9051 n**	**702500**	**409000**
6	**34° 49.4081 e**	**3° 47.3305 n**	**702500**	**419000**
7	**34° 49.6782 e**	**3° 47.3300 n**	**703000**	**419000**
8	**34° 49.6669 e**	**3° 41.9046 n**	**703000**	**409000**
9	**34° 49.9369 e**	**3° 41.9040 n**	**703500**	**409000**
10	**34° 49.9482 e**	**3° 47.3294 n**	**703500**	**419000**
11	**34° 50.2183 e**	**3° 47.3288 n**	**704000**	**419000**
12	**34° 50.2070 e**	**3° 41.9035 n**	**704000**	**409000**
13	**34° 50.4770 e**	**3° 41.9029 n**	**704500**	**409000**
14	**34° 50.4883 e**	**3° 47.3282 n**	**704500**	**419000**
15	**34° 50.7584 e**	**3° 47.3277 n**	**705000**	**419000**
16	**34° 50.7470 e**	**3° 41.9023 n**	**705000**	**409000**
17	**34° 51.0170 e**	**3° 41.9018 n**	**705500**	**409000**
18	**34° 51.0284 e**	**3° 47.3271 n**	**705500**	**419000**
19	**34° 51.2985 e**	**3° 47.3265 n**	**706000**	**419000**
20	**34° 51.2870 e**	**3° 41.9012 n**	**706000**	**409000**
21	**34° 51.5571 e**	**3° 41.9006 n**	**706500**	**409000**
22	**34° 51.5685 e**	**3° 47.3259 n**	**706500**	**419000**
23	**34° 51.8386 e**	**3° 47.3253 n**	**707000**	**419000**
24	**34° 51.8271 e**	**3° 41.9001 n**	**707000**	**409000**
25	**34° 52.0971 e**	**3° 41.8995 n**	**707500**	**409000**
26	**34° 52.1086 e**	**3° 47.3247 n**	**707500**	**419000**

Fig. 9 : plan de vol pour Kakuma

Chapitre 4

La prise de vue aérienne : le survol

Types d'avion léger : caractéristiques

Tout avion léger permettant la fixation d'une caméra convient. Avec la fixation que nous utilisons actuellement, il est nécessaire de retirer une porte pour fixer la caméra hors de l'avion, et d'avoir une vision libre du sol (ailes hautes). Les avions CESSNA remplissent ces conditions. La fixation utilise les glissières des sièges et se fixe perpendiculairement à l'axe longitudinal de l'avion, en laissant la caméra dépasser hors de l'appareil. Cette fixation rustique est censée s'adapter sur la plupart des avions disponibles dans les aéro-club.
La simplicité guide notre démarche : il faut pouvoir s'adapter aux conditions et aux disponibilités locales en ce qui concerne le vol aérien. Nous poursuivons notre démarche dans ce sens, en cherchant notamment à améliorer la simplicité de la fixation de la caméra (fixation par ventouses, montage sur cardan, fixation sous l'appareil sans enlever une porte).

L'avion utilisé au Kenya est un CESSNA Caravan, turbo-propulsé, 16 places, muni de nombreux instruments de navigation. La demi-porte inférieure arrière a facilement pu être ôtée et remplacée par un déflecteur prévu à cet effet (le pilote et le copilote se chargent de cette opération).

Fig. 10 : avion CESSNA Caravan de la compagnie BOSCOVIC Air Charter

La préparation du matériel

Pour le survol, il faut amener sur le tarmac :

- la caméra vidéo et ses accessoires : filtre UV, cassettes, vis de fixation, batterie interne chargée, micro externe, surface blanche pour la balance des blancs,
- Un chargeur d'alimentation 12 V pour la caméra (type chargeur pour allume-cigares), avec le câble d'alimentation chargeur-caméra,
- Une batterie 12V 7VAH (minimum) étanche, chargée, avec les câbles de connexion au chargeur d'alimentation,
- la fixation caméra-avion, munie de ses boulons et des outils pour sa fixation (clés plates, tournevis, équerre),
- Une mire de réglage pour la focale (pour les caméras à focale variable n'indiquant pas la focale),

- En option, un petit moniteur de contrôle 12 V avec entrée vidéo, un câble pour relier la sortie vidéo de la caméra et l'entrée vidéo du moniteur, un câble d'alimentation 12 V pour le moniteur, une batterie 12 V 3VAH (minimum) chargée,
- Ruban adhésif, ciseaux, fixations en plastiques pour câbles électriques. Bandes larges en caoutchouc (type chambre à air),
- En option, les GPS pour le contrôle différé du survol,
- Des vêtements compatibles avec les conditions météorologiques d'un vol porte ouverte, des bouchons d'oreille.

La caméra pourrait être alimentée par sa batterie interne, mais ces batteries ont une durée assez faible (moins d'une heure), et elles sont sensibles au froid (le froid diminue sensiblement la durée de charge d'une batterie). Pour s'affranchir des problèmes de durée d'alimentation, il nous semble préférable d'alimenter la caméra par une batterie 12 V externe offrant une autonomie de plusieurs heures.

Disposer d'un moniteur de contrôle pendant le vol est très utile pour vérifier que tout se passe bien (il est impossible de regarder dans le viseur de la caméra pendant le vol).

Préparation de l'avion
La porte latérale doit être enlevée, et remplacée par un déflecteur qui évite une prise au vent de la caméra et de trop fortes turbulences dans la cabine. Cette opération dépend de l'avion, elle peut être très simple (deux goupilles), ou beaucoup plus complexe (charnière piano).

Fig. 11 : préparation de l'avion (porte latérale, déflecteur)

Fixation de la caméra
La fixation de la caméra est elle-même fixée sur le plancher de l'avion grâce aux boulons prévus à cet effet. Nous ajustons sa position avec une équerre pour qu'elle soit perpendiculaire à l'axe longitudinal de l'avion.
La fixation permet également de fixer la batterie 12 V et l'alimentation correspondante pour la caméra. Tous les éléments mobiles et toutes les connexions doivent être assurés avec du ruban adhésif.

La caméra est fixée sur son support par la vis de fixation prévue à cet effet et par des fixations plastiques (qui ne servent qu'une fois).
La caméra doit être reliée à son alimentation, au microphone externe, au moniteur de contrôle.

Fig. 12 : fixation de la caméra dans l'avion

GPS embarqué
Si l'on veut enregistrer les positions de l'avion au cours du vol, il faut disposer de deux récepteurs permettant le positionnement GPS différentiel mobile (voir plus loin). L'un des GPS doit être situé sur un point dont la position est connue, l'autre GPS étant embarqué dans l'avion, à un endroit permettant une bonne visibilité du ciel pour assurer une bonne réception des satellites. Il suffit de démarrer la réception GPS au début du vol.

Vérification de la caméra

Nous avons établi une check-list des opérations nécessaires au réglage et à la vérification de la caméra, juste avant le vol.

Balance des blancs
La balance des blancs doit être effectuée juste avant le vol, pour assurer un bon rendu des couleurs et des contrastes. Il faut donc se munir d'une grande feuille blanche, de préférence collée sur un carton (il y a souvent du vent sur les tarmac).
Il faut régler la balance des blancs avant de régler la focale, et s possible avant de fixer la caméra sur son support.

Etalonnage du zoom
Il faut régler le facteur de zoom de la caméra à la focale prévue dans le plan de vol.
La caméra que nous avons utilisée (SONY DCR-VX1000E) ne comporte aucune indication visuelle de la focale utilisée, qui peut varier de 40 mm à 400 mm (équivalent 24*36). Nous devons fixer le zoom grâce à une mire de réglage que nous avons construite à cet effet, et qui ne peut être utilisée qu'avant fixation de la caméra sur son support. Si l'on veut s'affranchir de ce réglage (quelque peu délicat mais important), il faut prévoir un plan de vol avec la focale la plus courte.

Vitesse d'obturation et priorité vitesse
Pour obtenir des trames nettes, il faut une vitesse d'obturation élevée. Si la caméra fonctionne en mode automatique (vitesse et diaphragme), la vitesse reste trop faible. Il faut donc fixer la vitesse en

mettant la caméra en mode manuel ou semi-automatique (priorité vitesse). Dans les vols effectués, nous avons fixé la vitesse d'obturation à 1/1000 s. La caméra utilisée ne permet pas de bloquer à la fois la vitesse et le diaphragme.

Mise au point sur l'infini
La mise au point sur l'infini permet de s'affranchir des problèmes d'autofocus et des pertes d'énergie correspondantes.

Batterie, cassette
Vérification des raccordement, de la mise sous tension. Vérification de la présence d'une cassette dans l'appareil. Vérification d'enregistrement au sol (10 secondes). Vérification du microphone. La présence d'une batterie externe ne dispense pas de la batterie interne, qui doit être en pleine charge.

Assiette et orientation de la caméra
Juste avant le vol, il faut régler et vérifier la bonne assiette de la caméra, grâce aux niveaux prévus à cet effet sur la fixation.

En vol

En vol, il est utile d'avoir deux opérateurs, l'un se chargeant de la caméra, l'autre de la vérification du bon suivi du plan de vol et des communications avec le pilote. Porte ouverte, les conditions de travail sont précaires : bruit, vent, froid, turbulences rendent les possibilités d'intervention très limitées.

L'opérateur de la caméra a un rôle réduit à la vérification de la caméra. Sa principale préoccupation doit être le meilleur ajustement possible de l'assiette de la caméra, la mise en marche de la caméra au début des traces et son arrêt en fin de trace (si l'on veut économiser le temps effectif de prise de vue), la vérification du bon fonctionnement de la caméra (batterie, bande magnétique).

L'opérateur de suivi du vol assure la vérification sommaire du survol et la communication avec le pilote. Lorsque le pilote doit suivre un plan de vol, il est utile de vérifier le bon déroulement de ce plan de vol pour pouvoir revenir sur des traces qui paraissent avoir été mal suivies. Lorsque le pilote vole à vue, l'opérateur de suivi du vol doit indiquer en permanence au pilote le bon déroulement de sa navigation par rapport aux objectifs.

La vérification du survol

En embarquant un GPS dans l'avion, on peut enregistrer la position (en 3D) de l'avion pendant l'ensemble du vol, de manière à comparer le vol avec le plan de vol, une fois le survol effectué. Pour obtenir une précision suffisante, on doit utiliser des techniques de GPS différentiel mobile, ou avoir accès par radio aux données GPS d'une station fixe et répertoriée.

Exemple : suivi du survol du camp de HAGADERA par GPS différentiel mobile

Nous disposions de deux GPS MAGELLAN PROMARK X-CM. Un GPS a été positionné sur le tarmac, l'autre GPS étant embarqué et situé dans le cockpit de l'avion, sur le tableau de bord. Le GPS au sol était muni d'une antenne professionnelle, le GPS embarqué ne comportait que sa petite antenne d'origine.
Les deux GPS enregistrent les points en mode différentiel mobile, à raison d'un point par seconde pendant toute a durée du vol. La position du GPS fixe avait été calculée auparavant par une mesure en différentiel fixe (voir chapitre suivant).

Après le survol, les deux fichiers sont déchargés sur l'ordinateur portable et traités par le logiciel MSTAR fourni avec le GPS, et permettant d'obtenir un fichier de positions indiquant les coordonnées de chaque point (dans les trois dimensions), l'instant de capture, la validité du point (PDOP). Les points ont ensuite été visualisés grâce au module SAVAMER du système SAVANE, puis intégrés dans la base de données. Ainsi, nous avons pu comparer le vol avec le plan de vol précédemment établi, et constater le bon déroulement du survol : les écarts entre vol et plan de vol sont au maximum de 50 m, malgré un vent latéral important. Les entrées et sorties de traces sont, elles, encore plus précises : l'écart moyen n'y dépasse pas quelques mètres.

Cette expérience nous a également permis de vérifier la précision du GPS en mode différentiel mobile. Cette précision est excellente : l'incertitude ne dépasse pas 20 cm.

Figures du gps différentiel mobile
Figures des différentes statistiques : altitude, PDOP

Chapitre 5

Relevés de positions sur le terrain par GPS différentiel

Objectifs

Des images vont être extraites du film vidéo. Ces images déforment la réalité (mouvement de l'avion, distorsion due à l'optique, réfraction, etc.) : elles doivent être redressées pour être mises en conformité avec la géométrie de la surface réelle. Il faut également positionner ces images en les localisant sur la surface du globe. On appelle "redressement" ces deux opérations. Pour effectuer ce redressement, il faut disposer de points de référence au sol dont on connaît la position réelle (en longitude-latitude), et de leur emplacement dans l'image. Ces couples de point sont appelés des amers.
Si l'on ne dispose pas de photographies aériennes ou de cartes existantes suffisamment précises permettant de créer ces couples de points, il faut aller sur le terrain , avec les images imprimées de préférence, pour relever la position d'objets visibles à la fois sur les images et sur le terrain. Le nombre de points à relever dépend de la déformation estimée des images, mais plus on disposera de points d'amer, meilleur sera le redressement des images.

Grâce aux satellites su système GPS, il est maintenant possible de relever la position de points sur la surface du globe terrestre avec une grande précision. Ce chapitre décrit cette opération.

Géodésie et cartographie

Pour exprimer la position d'un point sur la Terre, on utilise une surface mathématique simple se rapprochant au mieux de la forme réelle de la Terre. Cette surface a la forme d'un ellipsoïde de révolution, et permet d'exprimer la position d'un point grâce aux coordonnées sphériques : la longitude, la latitude, l'altitude par rapport à la surface de l'ellipsoïde. En pratique, plusieurs formes et positions d'ellipsoïde sont utilisées : il est nécessaire d'être vigilant sur les paramètres de l'ellipsoïde (le datum) lors d'un relevé de coordonnées par GPS, car ces coordonnées sont exprimées par rapport à cet ellipsoïde.
Pour avoir des coordonnées dans le même référentiel sur l'ensemble du monde, un ellipsoïde universel a été défini par le Département de la Défense des Etats-Unis (DoD) : il s'agit de WGS 84 (World Geodesic System 1984 : a (grand coté) = 6378137 m, e^2 (carré de l'excentricité) = 0.00669437999013). C'est, en général, l'ellipsoïde utilisé par défaut par les récepteurs GPS. On peut néanmoins transformer des coordonnées d'un ellipsoïde à un autre, mais les calculs nécessitent de connaître les paramètres de position relative des deux ellipsoïdes concernés (pour la plupart des ellipsoïdes, ces paramètres sont disponibles par rapport au WGS 84). Les coordonnées d'un même point exprimées dans deux datum différents peuvent varier de plusieurs secondes d'arc (plusieurs dizaines de mètres après projection). Le programme Globe (système Savane) permet d'effectuer des transformations de datum.

Pour représenter un morceau de la surface de la Terre sur une surface plane, on utilise une opération de projection cartographique qui déforme la surface curviligne et la projette en deux dimensions sur une surface plane, dans un repère orthonormé dont l'unité est toujours le mètre : les coordonnées X et Y dans ce repère sont appelées coordonnées de projection. Cette opération utilise également les paramètres de l'ellipsoïde auxquels se réfèrent les coordonnées sphériques exprimées en longitude, latitude, altitude. Enfin, pour réduire la surface obtenue à celle d'une feuille de papier ou d'un écran d'ordinateur, on divise les coordonnées planes obtenues par un facteur de réduction (l'échelle). Néanmoins, les coordonnées indiquées sur une carte seront toujours des coordonnées de projection, avant mise à l'échelle, ou les coordonnées sphériques du point correspondant sur l'ellipsoïde.

Rappels généraux sur le GPS

Le système GPS (Global Positioning System) est un système de navigation et de positionnement mondial utilisant une constellation de 24 satellites. Son étude, son financement et son entretien sont entièrement assurés par le Département de la Défense des Etats-Unis.
Les satellites GPS sont au nombre de 24. Ils évoluent sur des orbites circulaires à une distance de l'ordre de 20200 km de la Terre, ce qui correspond à une période de rotation de l'ordre de 12 heures.
Les récepteurs GPS permettent de capter et traiter les signaux envoyés par les satellites.
La disponibilité du système dépend du nombre de satellites observables durant les mesures et de leur positionnement géométrique qui influe sur la qualité des résultats.

Dans un mode d'utilisation où le récepteur GPS fournit des coordonnées de manière instantanée et de façon autonome (mode absolu), le GPS permet de fournir une position à 100 m près. Cette précision très modeste est la conséquence de plusieurs facteurs :

- erreurs du segment spatial : erreur sur les paramètres orbitaux des satellites (20 m), erreur sur l'horloge propre du satellite par rapport au temps GPS (quelques mètres).
- erreur de propagation : le signal GPS se propage depuis le satellite vers l'antenne du récepteur. Il traverse ainsi la totalité de l'atmosphère terrestre et subit les influences des différentes couches. L'ionosphère retarde le signal en fonction de l'activité solaire et de la situation géographique (erreur entre 0 et 50 m). La troposphère influence la propagation du signal par l'intermédiaire de phénomènes de réfraction. Cette erreur est très sensible aux basses élévations du satellite (erreur entre 2 et 5 m).
- erreur de multi-trajets : le signal GPS peut subir, à l'approche de toute surface proche de l'antenne de réception, une réflexion qui rallonge le chemin optique parcouru. Cet effet est connu sous le terme de multi-trajets. On peut l'éliminer en éloignant l'antenne de toute surface métallique proche et en l'équipant d'un plan de masse absorbant les signaux réfléchis par le sol.
- erreur due à la précision de l'horloge du récepteur : cette erreur est plus importante que celle induite par l'horloge du satellite car la qualité de l'horloge détermine directement le coût du récepteur (environ 30 m).
- dégradation volontaire du DoD (50 à 100 m). Cette dégradation devrait prendre fin en 2002.

Comme la précision de la localisation GPS absolue est souvent insuffisante (et c'est ici notre cas), il est possible de contourner le problème et d'effectuer la localisation relative d'un point par rapport à une référence connue : deux récepteurs GPS vont faire des mesures simultanées sur les mêmes satellites, pour permettre de déterminer les différences de coordonnées entre les deux stations. On parle alors de GPS Différentiel. Le calcul des coordonnées se fait en post-traitement après déchargement sur un ordinateur des mesures enregistrées par les deux récepteurs.

Le Positionnement Différentiel par GPS

Il s'agit d'un positionnement relatif par rapport à une station de référence placée à proximité d'un point connu. On doit donc disposer de deux récepteurs qui effectuent des mesures simultanées, l'un sur le point à déterminer, l'autre sur la station de référence. Le principe du différentiel consiste à retirer les erreurs systématiques corrélées entre la station de référence et la station mobile. Le bilan d'erreur va être considérablement réduit :

- l'erreur d'horloge du satellite va s'annuler lors du traitement des observations simultanées.
- les erreurs d'orbite vont être résiduelles ou négligeables,
- l'erreur de propagation ionosphérique sera considérablement réduite si les deux récepteurs ne sont pas éloignés de plus de 20 km environ,
- l'erreur de propagation troposphérique sera également diminuée, surtout s'il n'existe pas une trop grande différence entre les conditions météo à chaque récepteur (attention aux grandes différences d'altitude),

- en revanche, les erreurs multi-trajets s'ajoutent les unes aux autres,
- l'erreur due à l'horloge du récepteur sera du même ordre que pour le positionnement absolu, mais peut être réduite par les méthodes de double différence.

La précision du positionnement relatif varie entre 0.1 et 5 m environ, et dépend essentiellement de la qualité des récepteurs et du nombre de mesures effectuées sur le point à mesurer.

Dans le cadre d'un GPS différentiel post-traité, la station de référence sera équipée d'une mémoire lui permettant d'enregistrer les mesures réalisées. Les mesures seront récupérées ultérieurement par l'utilisateur sur un ordinateur par connexion directe ou par modem. La station mobile enregistre également les mesures propres à chaque point. Le logiciel de post-traitement permet de traiter les mesures et de calculer les positions des points avec la précision requise. Plus le nombre de mesure augmente meilleure est la précision. Il faut au minimum une centaine de mesures pour permettre un calcul différentiel.

Si la position de la station fixe n'est pas connue, on pourra la déterminer soit par une moyenne sur un grand nombre de mesures, soit par calcul différentiel en utilisant des données de réception d'une station connue.

Le matériel

Nous disposons de deux récepteurs de type Magellan ProMark X-CM permettant une précision centimétrique en mode différentiel, par mesure de phases. Les récepteurs sont équipés de petites antennes amovibles, que nous avons remplacées par des antennes autonomes avec plan de masse permettant de minimiser les doubles trajets. Ces antennes sont auto-alimentées par un jeu de six piles AA. Les antennes sont reliées aux GPS par des câbles de plusieurs mètres. Nous disposons également d'un tripode de géodésie pour une antenne.
Les récepteurs sont alimentés par des jeux de six piles AA, par une alimentation extérieure 12 V continu (prise allume-cigares), ou par une alimentation 220 V alternatif.

Figures : GPS Magellan Promark X-CM et l'antenne sur son tripode de géodésie

Exemple : la prise de points sur le terrain à Dadaab

Point de base pour Dadaab : Le château d'eau du compound UNHCR. Position obtenue par moyenne sur quatre heures de mesure (écart-type 30 cm).

Longitude : 40° 18' 38.63 e
Latitude : 0° 3' 1.18 n
Altitude : 131 m
Tous les autres points ont une précision de l'ordre de 30 cm par rapport à la base.

Figure : château d'eau Dadaab

GPS Ifo
ellipsoïde WGS 84, UTM zone 7 est.

N° point	Longitude (deg min sec)	Latitude (deg min sec)	X (UTM)	Y (UTM)
1	**40° 18' 27.6714 e**	**0° 6' 7.6431 n**	645525.26	11290.63
2	**40° 18' 26.1742 e**	**0° 6' 27.0582 n**	645478.94	11886.88
3	**40° 18' 52.7683 e**	**0° 6' 30.2658 n**	646301.17	11985.43

4	**40° 19’ 8.7038 e**	**0° 7’ 0.1941 n**	646793.82	12904.57
5	**40° 19’ 24.4021 e**	**0° 6’ 33.0717 n**	647279.21	12071.64
6	**40° 19’ 5.9935 e**	**0° 6’ 21.3744 n**	646710.07	11712.38
7	**40° 18’ 36.6978 e**	**0° 7’ 7.4634 n**	645804.25	13127.77
8	**40° 18’ 22.1578 e**	**0° 7’ 5.9514 n**	645354.71	13081.32
9	**40° 18’ 25.7425 e**	**0° 6’ 13.7186 n**	645465.61	11477.21
10	**40° 18’ 27.4598 e**	**0° 6’ 13.8981 n**	645518.71	11482.73

Figure : prise de point sur le terrain
Figure : carte gps IFO

GPS Hagadera
Ellipsoïde WGS 84, UTM zone 7 est.

N° point	Longitude (deg min sec)	Latitude (deg min sec)	X (UTM)	Y (UTM)
1	**40° 22' 37.52711 e**	**0° 0' 27.46344 n**	653250.59	843.45
2	**40° 23' 4.83963 e**	**0° 0' 42.31480 n**	654095.06	1299.56
3	**40° 23' 23.67249 e**	**0° 0' 20.84403 n**	654677.35	640.16
4	**40° 22' 44.48576 e**	**0° 0' 12.91431 n**	653465.74	396.62
5	**40° 22' 5.74807 e**	**0° 0' 14.75908 n**	652268.02	453.28
6	**40° 22' 34.96175 e**	**0° 0' 7.15235 s**	653171.27	9999780.34
7	**40° 22' 13.40126 e**	**0° 0' 30.59070 s**	652504.65	9999060.51
8	**40° 21' 43.92631 e**	**0° 0' 20.24721 s**	651593.33	9999378.18
9	**40° 21' 57.37426 e**	**0° 0' 0.00412 n**	652009.12	0.13
10	**40° 21' 43.42893 e**	**0° 0' 8.46660 n**	651577.95	260.02
11	**40° 21' 3.85965 e**	**0° 0' 2.39329 n**	650354.53	73.50

Figure : carte gps Hagadera

GPS Dagahaley
Ellipsoïde WGS 84, UTM zone 7 est

N° point	Longitude (deg min sec)	Latitude (deg min sec)	X (UTM)	Y (UTM)
1	**40° 17’ 53.28873**	**0° 11’ 21.13002**	644461.67	20918.00
2	**40° 17’ 39.30619**	**0° 11’ 12.79209**	644029.38	20661.90
3	**40° 17’ 21.02936**	**0° 10’ 51.44641**	643464.36	20006.32
4	**40° 17’ 6.83882**	**0° 11’ 3.11361**	643025.60	20364.60
5	**40° 16’ 38.78768**	**0° 11’ 25.77771**	642158.28	21060.56
6	**40° 16’ 58.40260**	**0° 11’ 41.12036**	642764.68	21531.79
7	**40° 17’ 7.24282**	**0° 12’ 9.97049**	643037.93	22417.81
8	**40° 17’ 29.64553**	**0° 11’ 52.66090**	643730.61	21886.28
9	**40° 17’ 25.47761**	**0° 11’ 31.71123**	643601.79	21242.89
10	**40° 17’ 53.69498**	**0° 11’ 37.61586**	644474.19	21424.29
11	**40° 17’ 55.45202**	**0° 11’ 23.22025**	644528.55	20982.20
12	**40° 18’ 1.96056**	**0° 11’ 28.33349**	644729.76	21139.24

Figure : carte gps Dagahaley

Chapitre 6
Capture d'images fixes

Le principe de la vidéographie numérique

La vidéographie numérique permet d'obtenir 50 (pal/secam) ou 60 (ntsc) images par seconde, le signal vidéo correspondant à chaque image étant codé sous forme numérique. Le codage numérique permet de conserver intacte la qualité du signal vidéo, contrairement au codage analogique. Il permet également de récupérer sous forme numérique chaque image sans perte de qualité.
Les images enregistrées par une caméra vidéo sont appelées des trames, car lorsque l'on visualise une vidéo sur un écran cathodique, on affiche séquentiellement les trames en les entrelaçant : première trame sur les lignes paires, seconde trame sur les lignes impaires, troisième trame sur les lignes paires, etc. On obtient ainsi l'illusion de 25 (pal/secam) ou 30 (ntsc) images par seconde, avec une résolution verticale deux fois supérieure à la résolution de chaque trame, tout en assurant une fluidité parfaite d'une image à une autre lorsque le mouvement est important : la vidéo privilégie la qualité du mouvement à la qualité de l'image.

Le format miniDV

Le format miniDV est utilisé par la plupart des camescope numérique grand public. En Pal/Secam, il correspond à une taille de 768*550 pixels (720*560 en ntsc) pour chaque trame. Les cassettes disponibles ont une durée de trente minutes ou de une heure.

La capture d'images fixes

On utilise deux trames successives pour obtenir une image fixe à partir du signal vidéo. Le programme de capture effectue une moyenne entre les deux trames pour obtenir une résolution verticale identique à la résolution horizontale. Lorsque le mouvement est important, les différences entre deux trames consécutives sont importantes : dans ce cas, on utilise une seule trame avec une interpolation entre deux lignes pour compléter la résolution verticale.

La capture d'image fixe est une opération très simple. L'objectif étant de rassembler les images en les mosaïquant, il faut seulement veiller à conserver une zone de recouvrement suffisante entre deux images consécutives (environ 30 % de l'image). Nous utilisons un moniteur de contrôle pour visualiser le film vidéo lors de la capture des images. Dans la mesure du possible, il faut éviter de capturer des images dont la verticalité est médiocre. Lors de la capture, les mouvements latéraux de l'avion sont facilement perceptibles, et il convient de choisir si possible des images correspondant à une position de l'avion satisfaisante.

Exemples : images saisies à partir du film vidéo effectué sur le camp de Hagadera (une trace complète), images sur Nairobi, images sur Kakuma

Chapitre 7

Redressement et mosaïquage

Les images capturées à partir du film vidéo ne sont pas géoréférencées : elles comportent des déformations globales ou locales et doivent être redressées pour être mise au mieux en conformité avec la réalité géographique et être utilisées dans un système d'information géographique. Nous allons décrire dans ce chapitre toutes les opérations nécessaires à la réalisation d'une image géoréférencée de l'ensemble du territoire couvert par l'opération de vidéographie aérienne.

Déformations et redressement

Les images capturées à partir du film vidéo ne correspondent pas à la réalité géographique. Elles comportent des déformations globales, locales, elles ne sont pas positionnées dans l'espace, les échelles locales ne sont pas exactes, elles ne correspondent pas à la projection géographique choisie (UTM, Mercator, Lambert,…). Plusieurs types de déformation interviennent :

- les déformations dues au trajet des rayons lumineux et à l'optique de la caméra,
- les déformations dues au positionnement de la caméra : assiette et altitude,
- les déformations dues au relief de la surface,
- les déformations mathématiques pour s'ajuster à une projection géographique donnée.

Les déformations dues à l'optique de la caméra peuvent être modélisées en utilisant une mire. Ces déformations dépendent néanmoins de la focale. L'optique de la caméra que nous utilisons ne présente que très peu de déformations, même avec une focale courte. Rappelons que la focale la plus courte pour cette caméra représente un équivalent 24*36 de 40 mm environ, ce qui reste une focale assez longue dans le monde de la photographie aérienne.
Les déformations dues au trajet des rayons lumineux ne peuvent être facilement modélisées car elles sont fonctions des conditions atmosphériques. Nous les considérerons comme négligeables pour les altitudes de vol utilisées.
Les déformations les plus importantes sont dues au relief et au positionnement de la caméra par rapport à la verticale. Ces déformations dues au positionnement de la caméra sont de deux types : assiette et altitude. La caméra suit les mouvements de l'avion, car elle est fixée sur son support. Cette fixation ne permet de régler approximativement que l'azimut. En supposant que la surface photographiée soit plane, l'image rectangulaire obtenue lors de la prise de vue correspond en fait à un trapèze au sol. C'est une déformation projective, dont les coefficients peuvent être obtenus en connaissant l'équation du plan de la caméra. Comme la position de la caméra n'est pas connue à l'instant de la prise de l'image, l'équation du plan par rapport au plan de projection peut être calculée grâce à quatre points d'amers. La déformation projective rattrape également les différences entre l'altitude réelle de la caméra et l'altitude théorique du plan de vol.
Les déformations dues au relief doivent également être prise en compte. En effet, la déformation précédente ne tient pas compte de l'altitude des points dans l'image : les points sont projetés dans le plan comme s'ils étaient tous à l'altitude zéro, alors que la projection doit suivre une verticale, et non pas un rayon lumineux, à partir de l'altitude supposée du point. Pour prendre en compte cette déformation, il faut connaître le relief en tout point et donc disposer d'un modèle numérique de terrain.
L'image prise par la caméra correspond à la surface curviligne du terrain, alors que le résultat doit être donné dans un plan en utilisant une projection géographique, à partir de positions exprimées sur l'ellipsoïde de référence. Cette déformation mathématique est connue, c'est la projection géographique.

Le redressement de l'image va donc tenter de supprimer toutes ces déformations pour aboutir à une image géoréférencée dans un plan de projection, et correspondant au mieux à la réalité géographique.
Comme l'altitude n'est en général pas connue, nous utiliserons pour simplifier une déformation polynomiale de degré un, globale ou locale, pour simuler la déformation projective.

Le ré-échantillonage

Le redressement s'accompagne également d'un rééchantillonage : les pixels dans l'image d'arrivée n'ont pas forcément la même taille que les pixels dans l'image de départ. En fait, les pixels ne sont jamais les mêmes, puisqu'ils sont déformés par les nombreuses opérations de redressement. La démarche est donc inverse : on fixe la taille et la position d'un pixel dans l'image d'arrivée, et on calcule sa valeur en cherchant quel est ou quels sont les pixels dans l'image de départ qui lui correspondent, après toutes les déformations inverses. Le rééchantillonage consiste donc à choisir la taille du pixel dans l'image d'arrivée, et à choisir une fonction de calcul pour la valeur du pixel à partir des pixels qui lui correspondent dans l'image de départ (plus proche voisin, fonction bilinéaire, fonction bicubique, etc.). Cette opération est fondamentale : elle permet de passer, pour la taille du pixel, d'une valeur estimée dans l'image de départ à une valeur fixée, dans la projection donnée, pour l'image d'arrivée.

La résolution d'une image correspond à la taille de ses pixels et aux objets que l'on peut définir et discerner dans l'image avec cette taille de pixel (par exemple, avec un pixel d'un mètre, on discerne les voitures). La précision d'une image correspond quant à elle à la précision absolue de la localisation. Même si une image n'est pas géoréférencée, elle a une résolution approximative, que l'on estime souvent également en mètre par la taille d'un pixel.

L'opération de redressement

Les méthodes de redressement sont nombreuses : elles dépendent essentiellement du type de déformation auxquelles l'image à redresser est soumise, les possibilités de prise de points d'amers, la disponibilité d'un modèle numérique de terrain.

On peut utiliser :

- **Une translation** : dans ce cas, l'image est déjà conforme à la projection géographique, la taille du pixel est connue, la translation n'est utilisée que pour localiser l'image mais n'effectue aucune transformation sur les pixels. Un seul point de référence est nécessaire pour effectuer une translation.

- **Une translation et une rotation** : c'est la transformation la plus simple, à utiliser dans le cas où l'image est géographiquement correcte mais doit subir une translation et une rotation pour être en conformité avec le repère de la projection. Les distances dans l'image ne sont pas modifiées. Deux amers sont nécessaires pour effectuer cette transformation.

- **Une similitude** : c'est une translation et une rotation suivie d'une homothétie (mise à l'échelle). La similitude est à utiliser lorsque, pour être mise en conformité avec une projection géographique, l'image doit subir une translation, une rotation, puis une mise à l'échelle. La mise à l'échelle est identique sur l'ensemble de l'image, la déformation est identique quelque soit la direction (c'est une isométrie). Deux amers sont nécessaires pour cette transformation.

- **Une déformation polynomiale de degré 1** : cette déformation est identique à la similitude, sauf que la mise à l'échelle n'est pas identique quelque soit la direction. Trois amers sont nécessaires pour effectuer cette transformation.

- **Une déformation projective (ou homographie)** : c'est une projection classique d'un plan sur un plan à partir d'un point. C'est la déformation naturelle obtenue sur une photographie, lorsque le terrain photographié correspond à un plan. Cette transformation doit être combinée à une déformation prenant en compte l'altitude, sinon l'échelle obtenue n'est pas correcte. Quatre points

sont nécessaires pour fixer les coefficients de cette transformation, ce qui revient à calibrer la position de la caméra par rapport au plan de projection.

- **Une déformation par triangulation** : cette déformation combine une première transformation globale (rotation, similitude, polynomiale de degré 1, homographie), avec une déformation locale de degré 1 dans chaque triangle résultant d'une triangulation à partir des points d'amers saisis. Cette transformation est la plus efficace lorsque l'on ne dispose pas d'un modèle numérique de terrain permettant de connaître l'altitude en chaque point. En effet, elle établie un modèle de déformation polynomial de degré 1 dans chaque triangle. La déformation correspond à un découpage de l'espace en facettes planes, et si le réseau de point d'amers est dense et homogène (et d'autant plus dense que les différences d'altitude sont grandes), le redressement permet d'obtenir directement une image en conformité avec la projection géographique choisie. Ce type de déformation permet également d'assurer une jointure parfaite entre différentes images : une fois une image redressée, il suffit de saisir des points d'amers entre l'image redressée et l'image à recaler pour faire coïncider les deux images. La transformation initiale permet de caler grossièrement l'image à redresser : elle doit correspondre au mieux au type de déformation à laquelle est soumise cette image. Le redressement polynomial de degré 1 ou par homographie (si l'on connaît l'altitude des points d'amers) est souvent le plus adéquat.

Les déformations des images prises par vidéographie proviennent essentiellement de l'assiette de l'avion et du relief. Les déformations optiques sont négligeables, tout comme les déformations dues au transport des rayons lumineux. Le meilleur redressement s'effectue donc grâce à une transformation polynomiale de degré 1, ou d'une transformation projective (si on connaît l'altitude des points d'amers), suivie d'une transformation par triangulation. Si le réseau de point d'amers est suffisamment dense, toutes les déformations sont corrigées et l'image redressée est géographiquement correcte (les échelles locales sont exactes). La difficulté principale réside donc dans la disponibilité de ce réseau de points d'amers, points qui peuvent être obtenus soit à partir d'une cartographie existante, soit à partir d'images satellite (mais à une précision moindre, et à condition que l'image satellite soit elle-même bien redressée et géoréférencée), soit à partir de points GPS pris directement sur le terrain.

Le mosaïquage et l'introduction dans un SIG

Une fois redressée, une image peut être intégrée dans un ensemble de manière à constituer un orthophotoplan. Cette opération est appelée mosaïquage. La mosaïque ainsi constituée est géoréférencée, et est gérée et utilisée dans un système d'information géographique. Les nombreuses images provenant de la vidéographie disparaissent pour laisser place à un seul ensemble directement géré par le système d'information. Le système d'information géographique SAVANE a été utilisé pour toutes les opérations de redressement et de mosaïquage présentéesdans ce document.

Exemple : redressement de Hagadera

Chapitre 8

Utilisation dans un système d'information géographique

Rappel sur les systèmes d'information géographique

Les systèmes d'information géographique sont des systèmes de gestion de données bi- ou tridimentionelles. Ils permettent de gérer et de traiter la localisation dans l'espace des objets conservés, qui modélisent la réalité. Ces objets sont des zones, des lignes, des points, ou des pixels d'images. Chaque objet est décrit par des attributs : les objets décrits par les mêmes attributs sont regroupés en collections. Ces collections s'apparentent aux relations d'un système de gestion de base de données relationnelle classique.

Toutes les données géographiques présentent dans un SIG doivent pouvoir être mises en relation les unes avec les autres en utilisant leur localisation dans l'espace, pour les traiter ou les cartographier. Il est donc très important de bien gérer cette localisation dans l'espace, et d'en maîtriser tous les aspects : précision, validité, espace de référence, etc. Si le redressement des images vidéo est bien effectué, la mosaïque répond à ces critères et peut être utilisé dans un SIG et mis en correspondance avec d'autres objets localisés.

La gestion des mosaïques

Parmi les objets gérés par un SIG, les mosaïques d'images tiennent souvent une place à part. Dans le système SAVANE, ces objets sont intégrés dans la base de données au même titre que les autres types de données géographiques. Les mosaïques peuvent ainsi être utilisées sans effort particulier. Une fois intégrées dans la base de données, le système se charge de toute la gestion de ces mosaïques qui représentent souvent de grands volumes d'information.

Figure : une carte extraite de Savane

Digitalisation sur mosaïque

Une fois intégrée dans la base de données, une mosaïque peut servir de référence pour saisir d'autres objets : on peut digitaliser directement ces objets sur un écran d'ordinateur en utilisant la mosaïque comme fond cartographique de référence.

Figure : digitalisation des blocs sur Hagadera

Bibliographie générale

Généralités
Sciences géométriques et télédétection, L. Lliboutry, Masson, 1992
Géométrie projective, J.C. Sidler, Intereditions, 1993
Vision par Ordinateur, Outils fondamentaux, Radu Horaud, Olivier Monga, Hermes, 1995

GPS
Le GPS et ses applications, Leica, 1995
Magellan Promark X-CM, Operation Manual
Les principes du GPS, Hermes

SIG
GIS, a Computer Perspective, M.F. WorBoys, Taylor&Francis, 1995
SGBD Géographiques, Spécificités, M. Scholl and all, Thomson Publishing, 1996
Savamer, Manuel d'utilisation, Marc Souris, 1999
Savane, Manuel d'utilisation, Marc Souris, 1998